

骨料级配对再生混凝土强度和工作性能影响的试验研究和计算分析

石建光^{1,2}, 许岳周²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200036; 2. 厦门大学 土木工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 骨料级配是影响混凝土强度的主要因素之一。在水灰比 0.55 和水泥、细骨料、粗骨料的配合比为 1 2 2.75 情况下, 对不同粗骨料级配情况下的再生混凝土工作性能和抗压强度进行了试验测试, 通过试验发现再生混凝土破坏形态和普通混凝土破坏形态相似, 当混凝土工作性能有保证时, 再生混凝土的强度会增大。但当混凝土工作性能没有保证或变差时, 强度会降低。在不同粒径粒数分布满足分形规律和满足骨料级配的情况下, 计算了包裹骨料需要的水泥浆与总水泥浆的比值 γ , γ 值可以反映不同骨料级配变化引起的骨料表面积的变化。 γ 值越大, 骨料的表面积越大。 γ 较大时混凝土工作性能和抗压强度降低。比值 γ 较小时混凝土工作性能和抗压强度提高。中部粒径范围骨料级配的变化对再生混凝土工作性能和抗压强度有明显影响。再生骨料替代率分别为 50%、60%、100% 时, 粒径范围 9.5~19 mm 和 19~26.5 mm 的骨料级配接近, 再生混凝土强度可以高于天然骨料的混凝土强度。再生骨料替代大粒径范围骨料的强度小于替代小粒径范围骨料的强度。

关键词: 再生混凝土; 骨料; 级配; 工作性能; 强度; 包裹泥浆比 γ

中图分类号: TU528.041 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3550(2008)01-0082-05

Experiment research and analysis of aggregate gradation on the strength and workability of recycled concrete

SHI Jian-guang^{1,2}, XU Yue-zhou²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200036, China;

2. Department of Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Aggregate gradation is one of the main factors that influence the concrete strength and workability. Under the condition of water/cement ratio 0.55 and cement, fine aggregate and coarse aggregate mix ratio 1 2 2.75, the workability and compression strength of recycled concrete with different gradation is tested. It is discovered that the rupture appearance of recycled concrete is likeness to the ordinary concrete, and the concrete strength is high when the workability of fresh concrete is good, but the strength is low when the workability is poor. The variety of middle range aggregate gradation has obvious influence on the workability and compression strength of concrete. When the recycled aggregate replacement is 50%, 60%, 100%, and the content of aggregate particles in range 9.5~19 mm and 19~26.5 mm is near, the recycled concrete strength can be higher than the ordinary concrete. The compression strength of concrete containing bigger size recycled aggregate is higher than the strength of concrete containing smaller size recycled aggregate. On the supposition that aggregate particle number distribution satisfies fracture regulation and actual aggregate sieve gradation, the ratio γ of the mortar required packaging the aggregate particle and the total mortar is calculated. The ratio γ can reflect the variety of aggregate surface for the different aggregate gradation. If the ratio γ is bigger, the surface area is bigger. The γ value increasing means that the workability and strength lower and the γ value decrease means that the workability and strength advance.

Key words: recycled concrete; aggregate; gradation; workability; strength; mortar ratio γ

0 引言

由于国内大量的基本建设和各类工程建设需求, 使得我国水泥产量在 2003 年达到 8 亿 t, 占当年世界产量 42%, 排名第一^[1]。同时大量基础工程改造和城市大规模拆迁每年产生大约 2.4 亿 t 的废弃混凝土^[2]。将废弃混凝土再生利用, 既可有效减少建筑垃圾的数量, 同时可节省天然石料、保护自然资源, 是有效解决发展、环境、资源相互协调的有力措施。

废弃混凝土经过破碎、清洗、分级后, 按一定的比例混合形成再生骨料, 部分或全部代替天然骨料配制而成的新混凝土称为再生混凝土。大量的再生混凝土研究表明再生粗细骨料对混凝土各项性能都产生影响^[3-4]。经过对再生骨料的替代率和灰水

收稿日期: 2007-09-11

比的控制, 可以制备满足性能要求的各类混凝土, 但从中也发现相同水灰比下的再生混凝土性能差异比较大, 随替代率提高, 差异有增大的趋势, 反映出再生骨料的特性对混凝土性能的影响很大^[5]。研究人员对再生骨料的吸水率、压碎值指标等特性已经做了大量研究^[6], 但对再生骨料级配对混凝土性能的影响研究比较少, 而骨料级配既是影响混凝土性能的关键因素之一, 也是混凝土配合比设计的一个主要参数^[7], 为此本文就再生混凝土骨料级配对混凝土强度的影响进行研究。

1 试验内容

1.1 试验原材料

水泥采用福建水泥有限公司建福水泥厂生产的建福牌 32.5

级普通硅酸盐水泥,砂料为普通天然砂,拌合水为自来水。天然骨料采用天然石材加工而成的碎石,粒径范围为 4.75~31.5mm,连续级配。废弃混凝土块从厦门某住宅小区拆迁现场采集,采集现场如图 1 所示,采集的废弃混凝土运到碎石场破碎,碎石现场如图 2 所示。废弃混凝土经破碎加工而成,选取粒径范围 4.75~31.5mm 的骨料作为连续级配再生骨料。典型的骨料颗粒如图 3 所示,可以看出再生骨料颗粒有: 部分或全部水泥浆包裹的碎石骨料、水泥浆黏合几块碎石形成的骨料、水泥浆块和碎石黏合形成的骨料、单独的水泥浆块骨料和单独的碎石骨料等 5 种情况。天然骨料与再生骨料的级配见表 1, 再生骨料的级配与天然骨料略有不同,再生骨料中大直径颗粒相对较多。测试的骨料基本性能如表 2 所示,与大多数再生骨料特点相同,其堆积密度和表观密度小于天然骨料,吸水率、压碎值指标都大于天然骨料,再生骨料的针片状含量低于天然骨料。



图 1 采集现场



图 2 碎石现场

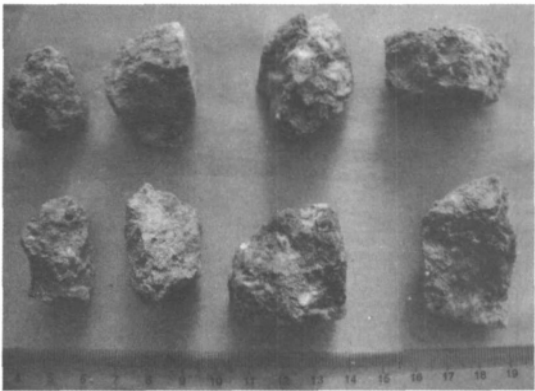


图 3 典型的骨料颗粒

表 1 骨料级配 %

	筛孔径				
	4.75 mm	9.5 mm	19 mm	26.5 mm	31.5 mm
天然骨料筛余量	100	97	44	12.7	0
再生骨料筛余量	100	89	63	25	0

表 2 骨料基本性能

骨料类型	堆积密度 (kg/m³)	表观密度 (kg/m³)	吸水率 /%	含水率 /%	压碎值指标 /%	针片状含量 /%
天然骨料	1 540	2 670	0.82	0.72	20	31
再生骨料	1 340	2 630	4.55	0.45	32	25

1.2 试验分组

按骨料的不同级配,试验分为 11 组,水灰比均为 0.55,单位体积细骨料相同,都为 800 kg。各组的骨料级配设计如表 3 所示,各组混凝土的骨料级配和配合比见表 4。按表 4 不同骨料粒径范围做出各组骨料的级配合比例如图 4 所示。

1.3 试块的制作与试验方法

所有试验混凝土拌合物均采用机器搅拌和振捣,按照 GB/T 50080—2002《普通混凝土拌合物性能试验方法》操作^[9]。24 h 后拆模,在标准养护条件下养护至一定龄期测试其抗压强度,试块尺寸均为 100 mm x100 mm x100 mm,抗压强度测试按照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》操作^[10],压力机型号为 YE- 2000。

表 3 各组级配设计

试验分组	天然碎石骨料	再生骨料	备注
A1	天然级配粗骨料	无	自然级配
A2	无	再生级配粗骨料	自然级配
A3	无	上包络线级配曲线再生粗骨料	依据 JG/T 10—1995
A4	无	下包络线级配曲线再生粗骨料	依据 JG/T 10—1995
A5	无	最佳级配曲线再生粗骨料	依据 JG/T 10—1995
A6	无	增加大直径骨料含量	人工级配
A7	无	增加小直径骨料含量	人工级配
A8	无	增加中直径骨料含量	人工级配
A9	40%	60%再生粗骨料	人工级配
A10	50%的 19~31.5 mm 骨料	50%的 4.75~19 mm 骨料	人工级配
A11	50%的 4.75~19 mm 骨料	50%的 19~31.5 mm 骨料	人工级配

表 4 混凝土的骨料级配和配合比

设计 编号	材料用量 (kg/m³)						
	级配				水	水泥	细骨料
	4.75~9.5 mm	9.5~19 mm	19~26.5 mm	26.5~31.5 mm			
A1	NA35	NA584	NA343	NA140	220	400	800
A2	RA121	RA198	RA506	RA275	220	400	800
A3	RA231	RA657	RA77	RA135	220	400	800
A4	RA106	RA510	RA176	RA308	220	400	800
A5	RA187	RA595	RA117	RA202	220	400	800
A6	RA55	RA330	RA275	RA440	220	400	800
A7	RA275	RA569	RA202	RA55	220	400	800
A8	RA55	RA385	RA330	RA330	220	400	800
A9	RA73	RA119	RA303	RA165	220	400	800
	NA14	NA234	NA137	NA56			
A10	RA137	RA413	NA413	NA137	220	400	800
A11	NA137	NA413	RA413	RA413	220	400	800

注: NA 表示天然骨料, RA 表示再生骨料, 其后数字为重量。

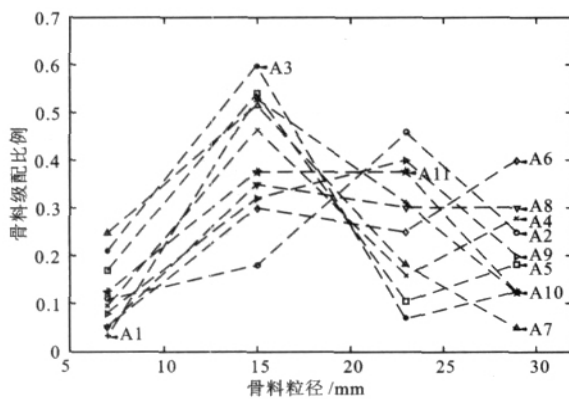


图 4 各组骨料的级配比例

2 试验结果和分析

2.1 再生混凝土的破坏形态

随着荷载的增大, 试块表面开始出现细小的裂缝; 荷载继续增大, 裂缝沿着受力方向发展, 裂缝主要集中于试块四角部分, 少量裂缝在试块中部出现; 荷载进一步增大, 裂缝开始向试

块中部发展, 且试块表面开始鼓起、剥落, 试块四角处出现很宽的裂缝; 再增加荷载, 混凝土块大量剥落, 试块四角完全剥落, 最终形成倒四角锥, 破坏过程见图 5。

从试块的外在破坏形态来看, 再生混凝土破坏形态和普通混凝土破坏形态相似。

2.2 各组混凝土的工作性能和强度

测试的各组混凝土的坍落度、保水性、和易性以及抗压强度如表 5。从中可以看出不同骨料级配的混凝土不仅其工作性能相差很大, 不同龄期的混凝土强度也相差很大。

2.3 试验结果分析

由于各组混凝土试块的水灰比和配合比相同, 骨料级配的不同将形成不同的内部结构。由于再生骨料吸水率大于天然骨料, 所以随再生骨料的增加, 骨料吸取了水泥浆体中更多的水分, 使得水泥浆体的实际水灰比降低, 当混凝土工作性能有保证时, 混凝土的强度会增大, 如 A6、A8~A11 各组的测试结果。但当混凝土工作性能没有保证或变差时, 强度会降低, 如 A2~A5、A7 各组的测试结果。特别是增加小直径骨料含量, 使得工作性能降低, 强度也很低。如 A7 的测试结果。

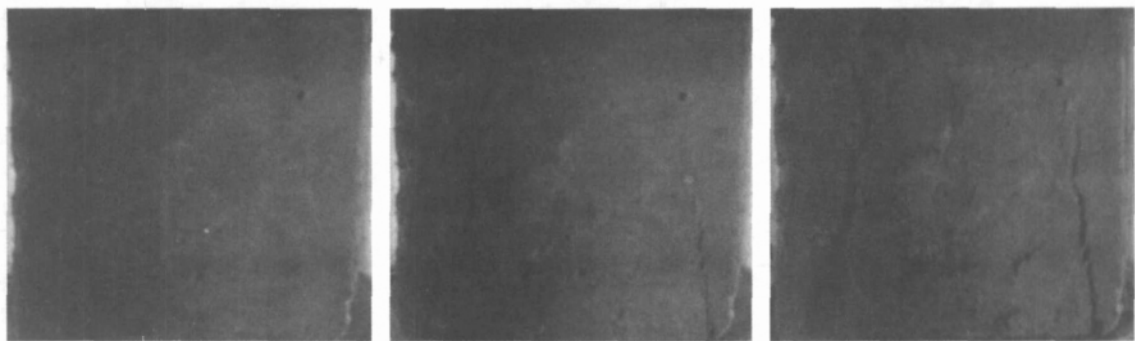


图 5 试块破坏过程

3 骨料级配对混凝土抗压强度影响的理论分析

骨料与水泥浆的交接面强度是影响混凝土强度的一个主要因素^[1]。当交接面强度比较低时, 混凝土强度也比较低, 而交接面强度高时, 混凝土强度也高。当再生骨料吸取水泥浆体中的水分降低了水泥浆实际的水灰比, 使得交接面强度提高时, 再生混凝土的强度就会提高。但当再生骨料吸取水分后的水泥

浆水灰比很小, 使得交接面强度降低时, 再生混凝土的强度也会降低。

交接面的强度主要由水泥浆包裹骨料的质量即水泥浆和骨料之间的结合层控制^[12]。混凝土中骨料总表面积 Ω 就是结合层的面积, 当结合层厚度取相同值 h , 就可以得到包裹骨料需要的水泥浆体积 $\Delta = \Omega \cdot h$, 用包裹骨料需要的水泥浆体积 Δ 除以混凝土中水泥浆总体积 V 可得比值 $\gamma = \Delta/V$, γ 反映了水泥浆和

表5 各组混凝土的工作性能和抗压强度

设计 编号	坍落度 /mm	保水性	和易性	7 d 强度 /MPa	28 d 强度 /MPa	56 d 强度 /MPa
A1	50	好	好	19.1	29.3	33.9
A2	35	较好	较好	12.5	18.4	19.2
A3	40	差	差	10.3	13.4	14.9
A4	39	差	差	9.2	13.0	13.5
A5	70	一般	一般	8.7	12.9	13.7
A6	80	好	好	27.1	43.0	44.1
A7	30	差	差	7.0	10.8	12.1
A8	50	一般	一般	29.4	38.8	42.0
A9	70	好	好	30.8	37.9	48.2
A10	40	一般	一般	30.0	42.4	45.2
A11	60	较好	较好	27.2	40.8	46.2

骨料之间形成结合层的相互关系。 γ 越接近 1, 说明水泥浆体包裹骨料越难, 结合层质量越难以保证。计算不同级配再生骨料的 γ_c , γ_c 可反映不同再生骨料级配吸取水分的程度。 γ 越大, 说明骨料的吸水越多。

3.1 骨料总表面积 Ω 的计算

骨料总表面积 Ω 的计算过程如图 6 所示, 骨料尺寸的范围为骨料筛分测试的上下限, 如本次试验中的骨料为 4.75~31.5 mm。为将连续分布的骨料尺寸离散化, 将骨料的尺寸按一定的尺寸差异进行分割, 如尺寸差异按 1 mm 分割, 则本次试验的骨料尺寸可用 [5, 6, 7...31] 的离散骨料尺寸表示。如本次骨料筛分为 [4.75~9.5, 9.5~19, 19~26.5, 26.5~31.5] 4 段, 则每段内的骨料尺寸 d 分别为 [5, 6, ...9]、[10, 11, ...19]、[20, 21, ...26] 和 [27, 28, ...31]。

如果骨料的形状假定为以其尺寸 d 为直径的球体, 则不同的骨料表面积为 $4\pi d^2$ 。骨料级配可采用理论曲线或实际混凝土配合时各部分骨料的重量, 如本次试验 A1 组四部分骨料的重量分别为 [35, 584, 343, 140], 其级配为 [0.031 8, 0.529 9, 0.311 3, 0.127 0]。

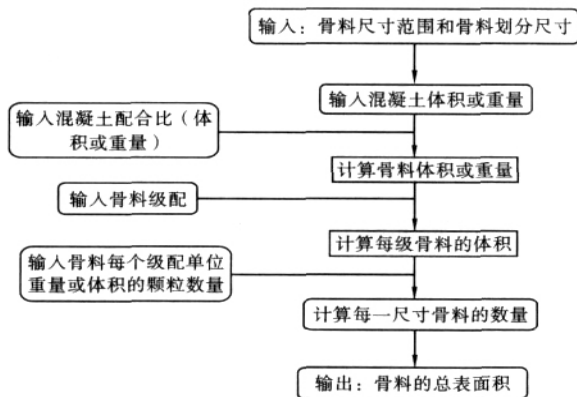


图6 骨料总表面积计算框图

假定不同粒径粒数分布满足分形的规律^[13], 按照分形概念, 粒数分布曲线的分形度量公式可以写成:

$$N(d) = N_0 d^D \quad (1)$$

式中: $N(d)$ ——粒径尺寸为 d 的粒数;

N_0 ——分形常数;

D ——分形维数。

式 1) 适用于对分形曲线、分形面积和分形体积的度量。当 $D=1$ 时, N, d 对应于线; 当 $D=2$ 时, N, d 对应于面积; 当 $D=3$ 时, N, d 对应于体积。取 $D=3$ 代入 (1) 计算得出的骨料数量要满足

骨料级配不同范围的体积要求, 即:

$$V_i = \sum_{n=1}^m 4\pi d_n^3 N(d_n) \quad (2)$$

式中: V_i ——第 i 段骨料范围的体积, 本试验中 $i=4$; V_i 可以通过骨料级配、骨料重量和密度计算得出;

m ——第 i 段骨料粒径尺寸的个数。

由此可通过式 1) 和式 2) 确定各部分骨料的分形常数 N_0 , 得出满足骨料级配要求的各粒径骨料数量 $N(d_i)$ 。从而骨料总的表面积为:

$$\Omega = \sum_{j=1}^k 4\pi d_j^2 N(d_j) \quad (3)$$

式中: k ——骨料粒径尺寸的总个数;

d_j ——第 j 个粒径尺寸的骨料直径。

3.2 比值 γ 的计算

水泥浆和骨料之间的结合层厚度 h 因不同的结合层理论定义可以从 50~100 μm 到几毫米级^[14], 对相对指标 γ 的计算, 可忽略厚度 h 取值的影响, 计算中取 0.1 mm。混凝土中水泥浆总体积 V 为水泥、水和砂的体积总和。由此可按下式计算比值 γ :

$$\gamma = \Delta/V = \Omega h/V \quad (4)$$

计算表 3 各组骨料的相对比值 γ , 与实测的混凝土受压强度关系如图 7 所示。比较图 4 和图 7 可以看出, 相对比值 γ 可以反映不同骨料级配变化引起的骨料表面的变化。如 A3 组小尺寸骨料增多, 骨料表面积增大, 比值 γ 增大。而 A2 组由于大尺寸骨料增多, 骨料表面积减小, 比值 γ 减小。比值 γ 与骨料面积有很好的相关性。

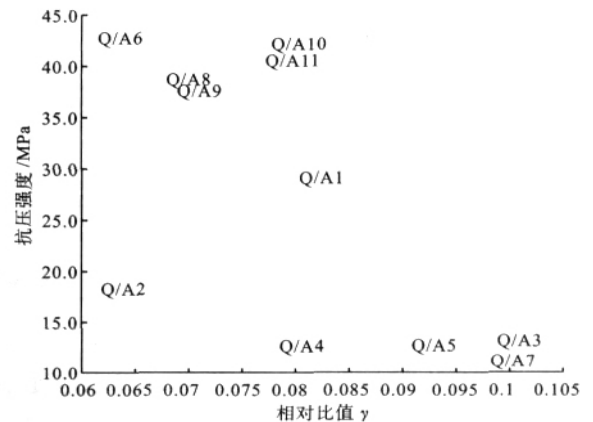


图7 相对比值 γ 与混凝土受压强度的关系

3.3 计算和试验结果分析

从图 7 可以看出, 当比值 γ 大于 0.085 时, 不论混凝土工作性能好坏, 如 A3、A5、A7 组, 受压强度为 10.8~13.4 MPa。当比值小于 0.085 时, 混凝土工作性能较好, 受压强度可以达到 29.3~43.0 MPa。但其中增加粒径范围为 9.5~19 mm 的骨料, 同时减少粒径范围为 19~26.5 mm 的骨料, 如 A4; 或减少粒径范围为 9.5~19 mm 的骨料, 同时增加粒径范围为 19~26.5 mm 的骨料, 如 A2; 混凝土工作性能较差, 受压强度降低为 13.0~18.4 MPa。所以, 当比值 γ 比较小, 如本例中小于 0.085 时, 中部粒径范围 9.5~26.5 mm 骨料级配差异较小时, 混凝土工作性能较好, 受压强度高; 而当中部粒径范围 9.5~26.5 mm 骨料级配差异较大时, 混凝土工作性能差, 受压强度低。当比值 γ 比较大, 如本例中大于 0.085 时, 混凝土工作性能差, 受压强度低。

按《混凝土泵送施工技术规程》要求的骨料级配制备再生混凝土,如 A3、A4、A5 组,混凝土工作性能差,受压强度为 12.9~13.4 MPa,强度比较低。而增加粒径范围 26.5~31.5 mm 和 19~26.5 mm 的骨料含量,如 A6、A8 组,混凝土工作性好,受压强度达到 38.8~43.0 MPa,强度比较高。当增加粒径范围 4.75~9.5 mm 的骨料含量,如 A7 组,混凝土工作性能差,受压强度仅为 10.8 MPa,强度很低。

采用再生骨料的自然级配制备混凝土,如 A2,尽管比值比较小,但混凝土工作性能差,受压强度为 18.4 MPa,强度低。再生骨料替代率分别为 50%、60%、100%时,通过调整粒径范围 9.5~26.5 mm 的骨料,使其级配接近,再生混凝土强度可以高于天然骨料的混凝土强度,如 A10、A11、A9、A6、A8 组的强度为 38.8~43.0 MPa 高于 A1 组强度 29.3 MPa。

再生骨料替代粒径范围 4.75~19 mm 的骨料与替代粒径范围 19~31.5 mm 的骨料分别制备再生混凝土,如 A10、A11 组,替代大粒径范围骨料的强度小于替代小粒径范围骨料的强度。

4 结论

通过试验测试和计算分析,可以得出如下结论:

(1) 相对指标 γ 可以反映不同骨料级配变化引起的骨料表面的变化。 γ 值越大,骨料的表面积越大,包裹骨料需要的水泥浆越多。当水灰比为 0.55 时, γ 大于 0.085 时,混凝土工作性能较差,受压强度低。当比值 γ 小于 0.085 时,混凝土工作性能较好,受压强度高。

(2) 当比值 γ 比较小时,中部粒径范围 9.5~26.5 mm 骨料级配差异较小时,混凝土工作性能较好,受压强度高;而当中部粒径范围 9.5~26.5 mm 骨料级配差异较大时,混凝土工作性能差,受压强度低。

(3) 按《混凝土泵送施工技术规程》要求的骨料级配制备再生混凝土,混凝土工作性能差,受压强度比较低。

(4) 增加粒径范围 19~26.5 mm 和 26.5~31.5 mm 的骨料含量,混凝土工作性好,受压强度高。而增加粒径范围 4.75~9.5 mm 的骨料含量,混凝土工作性能差,受压强度低。

(5) 采用再生骨料的自然级配制备混凝土,尽管比值 γ 比较小,但混凝土工作性能差,受压强度低。

(6) 再生骨料替代率分别为 50%、60%、100%时,调整粒径范围 9.5~26.5 mm 的骨料,使其级配接近,再生混凝土强度可以高于天然骨料的混凝土强度。

(7) 再生骨料替代大粒径范围骨料的强度小于替代小粒径范围骨料的强度。

参考文献:

- [1] MENZIE D, TSE P K, FENTON M, et al. U.S. geological survey china's growing appetite for mineral[s] [EB/OL]. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/asia.html#ch>.
- [2] XU Yue-zhou, SHI Jian-guang. Estimation and forecasting of concrete debris amounts in China[C]. Proceeding of ISSS 2005, 2005: 944-957.
- [3] ASTM C 294-05. Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates[S].
- [4] KIKUCHI M, DOSHO Y, NARIKAWA M, et al. Application of recycled aggregate concrete for structural concrete, part - I: experimental study on the quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete[C]. // Proceedings of the international conference on the use of recycled concrete aggregates. UK: Thomas Telford, 1998: 55-68.
- [5] 许岳周, 石建光. 再生骨料及再生骨料混凝土的性能分析与评价[J]. 混凝土, 2006(7): 41-46.
- [6] SAGOE-CRENTSIL K K, BROWN T, TAYLOR A H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate[J]. Cement and Concrete Research, 2001(31): 707-712.
- [7] STOCK A F, HANNANT D J, WILLIAMS R I T. The effect of aggregate concentration up on the strength and modulus of elasticity of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 10(31): 225-234.
- [8] JGJ/T 10—1995, 混凝土泵送施工技术规程[S].
- [9] GB/T 50080—2002, 普通混凝土拌合物性能试验方法[S].
- [10] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [11] DIAMOND S. The microstructure of cement paste and concrete: a visual primer[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(8): 919-933.
- [12] TASONG W A, LYNSDALE C J, CRIPPS J C. Aggregate-cement paste interface Part I. Influence of aggregate geochemistry [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(7): 1019-1025.
- [13] DIAMOND S. Aspects of concrete porosity revisited [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8): 1181-1188.
- [14] 陈云钢, 孙振平, 肖建庄. 再生混凝土界面结构特点及其改善措施[J]. 混凝土, 2004(2): 10-13.

作者简介: 石建光(1962-),男,教授,主要从事混凝土基本性能和混凝土结构研究。

单位地址: 厦门大学土木工程系 361005

联系电话: 0592-2183593

行业资讯

星马华菱携手亮相 2007 年上海混凝土工业展

在 2007 年 12 月 5~7 日的上海混凝土工业展上,安徽华菱汽车股份有限公司与安徽星马汽车股份有限公司再度联手,携一台 42 米混凝土泵车和一台 12 方混凝土搅拌车亮相上海新国际博览中心,展示中国最大的工程类专用车企业实力和国内最先进重卡的风采。

一台 42 米的华菱底盘泵车和 12 立方华菱底盘平顶四桥搅拌车代表了星马与华菱合作的结晶。展会上老外很多,经常会到我们的接待台前询问价格和参数等,在得知我们已经向中东和俄罗斯出口了大量搅拌车和自卸车后,纷纷向我们竖起大拇指,他们索要名片的、有拿资料样本的、有向我们表示愿意合作的,火热场面一度使旁边展台门可罗雀。

这次参展的 12 方混凝土搅拌车,采用代表国内最先进水平的华菱底盘,采用进口三菱 7 挡变速箱,有很好的针对性,宽敞大方,上装部分采用德国 ZF 和力士乐的液压系统,性能稳定,质量可靠。整个车辆外观刚劲有力,内部做工精细,每处都能体现出星马搅拌车的王者气派。虽然这次展会让搅拌车抢尽了风头,但泵车还是很好的配合演绎了属于自己角色,华菱底盘加上星马上装无疑展示了星马集团精湛的工程机械制造技术,并逐步在中国的泵车市场分得了一杯羹,相信不久之后我们的泵车必将在国内外市场上大显身手!